

[文章编号] 1004-0609(2001)01-0063-05

离心加速条件下金属液中粒子的相互作用^①

于思荣¹, 任露泉², 庞宇平²

(1. 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学 地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130025)

[摘 要] 建立了金属液中第二相粒子在离心加速条件下的运动规律理论模型, 并根据该理论模型分析了金属液中第二相粒子的相互作用规律。结果表明: 在离心加速场中粒子一直处于加速状态, 不会达到匀速运动状态; 粒子直径越大、密度越大, 在同样时间内, 粒子移动的距离越远; 在传输过程中, 不但有因尺寸不同引起的粒子追逐现象, 而且有因密度不同引起的追逐现象, 该现象是引起粒子碰撞、聚集及尺寸大(或密度大)粒子偏聚到试样外侧的主要原因。径向上初始位置不同的两个粒子, 其间距随时间延长逐渐增大。如果在径向一条直线上有多个同间距的粒子, 离心移动一段时间后, 虽然任意两相邻粒子的间距比开始态增大, 但各相邻粒子间距在新的时刻仍是相等的。

[关键词] 离心加速场; 梯度功能材料; 粒子; 理论模型; 两相流

[中图分类号] TB333

[文献标识码] A

梯度功能材料是 20 世纪 80 年代随着航空航天技术的发展而开发出来的一类新型材料, 该材料的主要特点是其表面耐磨、耐热、耐腐蚀, 而整体又具有比较好的强韧性, 断面组织及性能呈梯度变化^[1, 2]。离心技术是目前制造梯度功能材料的一种简便易行的新方法, 其主要原理是利用液态金属中第二相粒子与基体存在密度差, 在离心力作用下两相位置产生相对偏移, 得到第二相粒子由材料一侧向另一侧呈梯度分布的新材料^[2~4]。近年来国内外已采用该方法开发出多种合金类型的梯度功能材料^[4~6]。在理论研究方面也开展了一些工作, 但尚存在很多问题有待于开展进一步的研究。

文献[7]分析了离心力场中粒子的受力情况, 建立了力的平衡方程, 但方程中将重力系数 $G = \omega^2 r / g$ 当做常数 $G = 2DN^2$ (其中, ω 为旋转角速度, r 为粒子所处位置的旋转半径, g 为重力加速度, D 为铸型的内径, N 为离心机单位时间转动的圈数)来处理, 得出微分方程的解为

$$\frac{dr}{dt} = v_r = \frac{|\rho_p - \rho_L| G g d_p^2}{18\eta} \left[1 - \exp\left(-\frac{18\eta}{\rho_p d_p^2} t\right) \right] \quad (1)$$

式中 v_r 为粒子的径向运动速度, η 为液体的粘度, d_p 为粒子的直径, ρ_p 和 ρ_L 分别为粒子及液体的密度, t 为离心机转动时间。

文献[8, 9]通过受力分析也得出与文献[7]类

似的力的平衡方程, 但在求解时, 假定粒子的受力达到了平衡, 即令方程中的 $d^2 r / dt^2 = 0$, 而解出

$$r = r_0 \exp\left[\frac{2\omega^2(\rho_p - \rho_L) R_p^2}{9\eta} t\right] \quad (2)$$

从而使方程的解失去普遍意义且不准确。式中, r_0 为粒子的初始位置距轴心的距离, R_p 为粒子半径。

文献[10]直接采用 Stokes 方程得出离心力场中的速度表达式:

$$v_r = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_L)}{18\eta} \omega^2 r \quad (3)$$

在离心力场中, 该 Stokes 方程是否适用是值得商榷的。

本文作者在精确求解离心加速场中粒子运动规律微分方程的基础上, 着重分析探讨了影响粒子在液相中运动规律的因素及运动过程中粒子间的相互作用, 以便为离心法制备梯度功能材料提供理论指导。

1 离心加速条件下粒子运动模型的建立及求解

以立式离心装置为研究对象, 在该离心力场中, 假设粒子密度大于液体密度(即 $\rho_p > \rho_L$), 则粒子在垂直方向上受重力 F_g 和浮力 F_f 。在水平方向上的受力包括三方面: 一是离心力 F_1 , 一是粒子向

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59771055)

[收稿日期] 2000-04-19; [修订日期] 2000-08-23

[作者简介] 于思荣(1964-), 教授, 博士。

外侧移动时受到的阻力 F_2 ，再是在离心力场中水平方向产生的与离心力方向相反的“浮力” F_3 (如图1所示)。

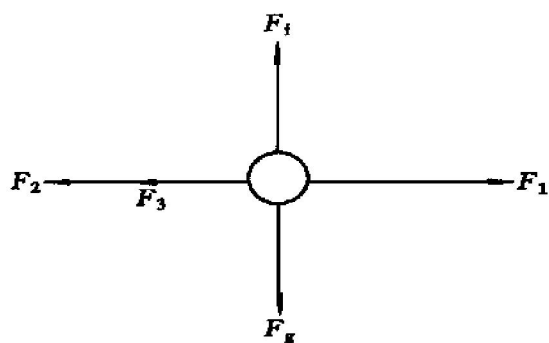


图1 离心加速条件下金属液中粒子受力图

Fig. 1 Schematic diagram of forces acted on particle in metal melt under the condition of centrifugal acceleration ($\rho_p > \rho_L$)

由于在离心力场中重力系数较大，即粒子所受离心力相对于自身重力较大，加上垂直方向上重力与浮力的相互抵消作用，垂直方向粒子的受力对其运动规律的影响很小，故在垂直方向粒子的受力可忽略不计^[9]。

在水平方向粒子所受离心力及其在离心力场中所受的“浮力”分别为

$$F_1 = m_p \omega^2 r \quad (4)$$

$$F_3 = m_L \omega^2 r \quad (5)$$

式中 m_p 和 m_L 分别为粒子及粒子排开液体的质量。

由于金属液存在粘度，运动的第二相质点不可避免地受到移动阻力。假设质点为细小的球形粒子，可近似采用层流状态下的阻力公式：

$$F_2 = 3\pi\eta d_p v_r \quad (6)$$

在铸型预热较好，金属液冷速较慢的情况下，可以假定液体的粘度 η 不受温度及时间影响，为常数。

根据牛顿第二定律，粒子在水平方向上所受合力 F 为

$$\begin{aligned} F &= F_1 - F_3 - F_2 \\ &= \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_L) \omega^2 r - 3\pi\eta d_p v_r \\ &= \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p a \end{aligned} \quad (7)$$

式中 a 为粒子的加速度。整理后得

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{18\eta}{\rho_p d_p^2} \frac{dr}{dt} - \frac{(\rho_p - \rho_L) \omega^2 r}{\rho_p} = 0 \quad (8)$$

解得

$$r = \frac{r_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) \quad (9)$$

式中

$$\lambda_{1,2} = \frac{-a_0 \pm \sqrt{a_0^2 - 4b_0}}{2} \quad (\text{其中 } a_0^2 - 4b_0 \geq 0)$$

$$a_0 = \frac{18\eta}{\rho_p d_p^2}$$

$$b_0 = -\frac{(\rho_p - \rho_L) \omega^2}{\rho_p}$$

式(9)就是离心力场中粒子所处位置与运动时间的函数关系。

对式(9)进一步求导，可得粒子在任一时刻的速度及加速度：

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{r_0 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \quad (10)$$

$$a = \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{r_0 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_1 e^{\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{\lambda_2 t}) \quad (11)$$

由于 $a_0 > 0$, $b_0 < 0$, 则 $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 < 0$, 所以当 $t > 0$ 时, $r(t) > 0$, $v_r(t) > 0$, $a(t) > 0$ 。鉴于 $a(t) \neq 0$, 因此粒子运动不会达到所谓的平衡状态，即在离心加速场中颗粒一直处于加速状态。因此将式(9)、式(10)与式(1)~(3)相比，不难看出式(9)和式(10)更为合理。

2 离心加速条件下金属液中第二相粒子相互作用分析

在离心加速场中，决定粒子某时刻位置的因素主要包括金属液的性质、粒子本身性质及设备的性能参数三方面。在假定金属液性质及设备的性能参数一定的条件下，具体影响因素主要有粒子尺寸、粒子密度及粒子初始位置等。以铝合金为例，其动力粘度约为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，密度约为 $2.371 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，离心机转速为 1400 r/min ，将数据代入式(9)，可以算得粒子位置随时间的变化关系。

2.1 粒子直径的影响

根据式(9)，粒子直径对 λ_1 和 λ_2 均有影响，因此，从式(9)中很难看出粒子直径对粒子所处位置的影响规律，只能通过数值计算得出规律。

图2为初始位置一定($r_0 = 15 \text{ mm}$)时，不同直径的粒子在离心加速场中移动位置与时间之间的关系，假设粒子密度为 $3.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。可见，随粒子直径增大，粒子移动距离急剧增大。图3为SiC_p/Al-8.8%Si合金梯度材料的组织分布照片，可见该梯度材料外侧附近大尺寸的SiC粒子含量较多，证实了在同等条件下，大尺寸粒子移动距离远这一观点。

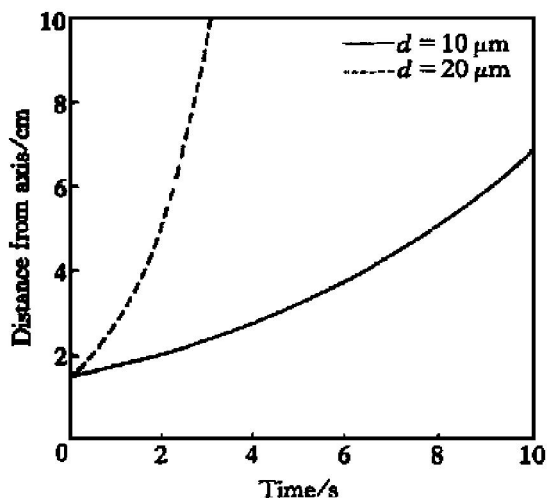
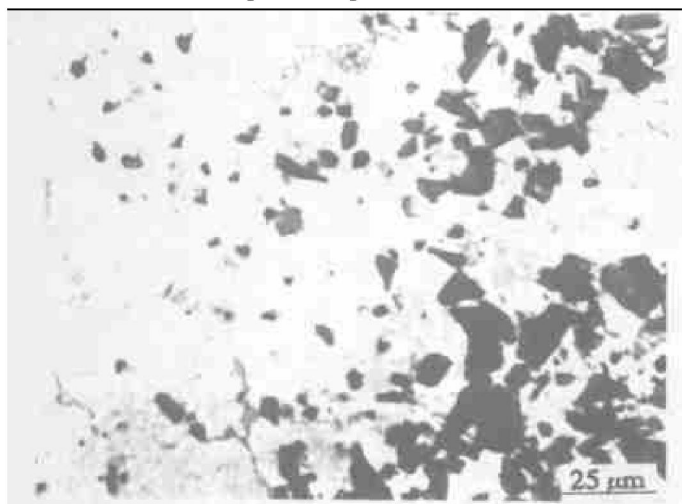


图 2 粒子直径对粒子位置的影响

Fig. 2 Effect of particle diameter on particle position

图 3 SiC_p/Al-8.8%Si 合金梯度材料组织Fig. 3 Microstructure of SiC_p/Al-8.8%Si functional gradient material

2.2 粒子密度的影响

粒子的密度也同样影响着式(9)中的 λ_1 和 λ_2 , 通过对相同条件下密度为 $3.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的 Al_3Fe 粒子及密度为 $3.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的 SiC 粒子移动距离随时间的变化进行数值计算, 可以发现在相同条件下密度较大的粒子其运动距离也较大(见图 4)。

2.3 粒子初始位置的影响

径向上初始位置不同的两个粒子, 其间距也不是一常量, 而是随着时间的延长, 其间距逐渐增大(见图 5)。

设在径向一条直线上有两个粒子, 根据式(9), 任意时刻两个粒子的间距为

$$\Delta r = \frac{\Delta r_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) \quad (12)$$

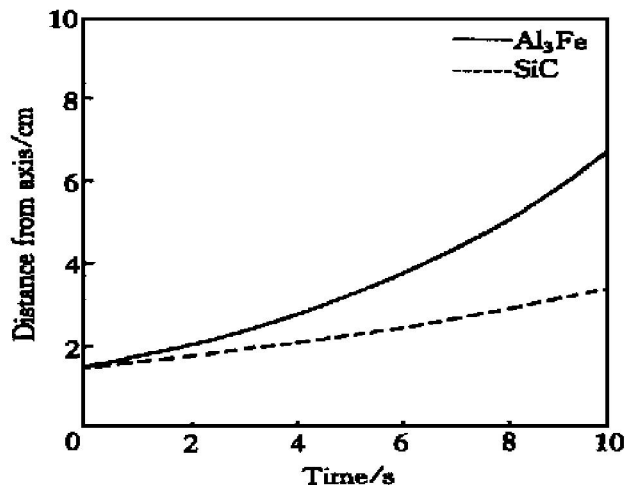


图 4 粒子密度对粒子位置的影响

Fig. 4 Effect of particle density on particle position

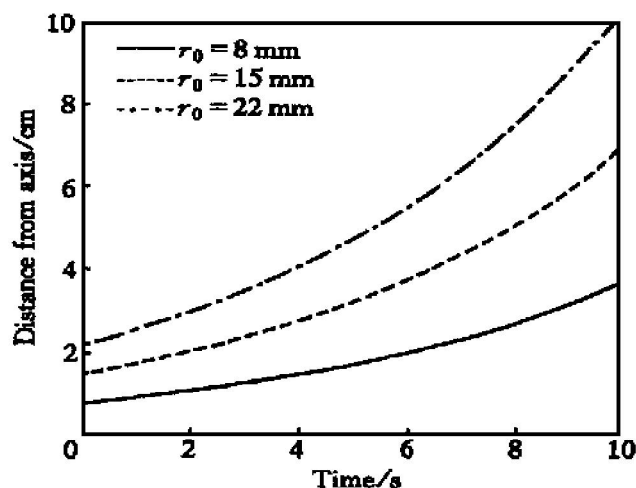


图 5 粒子间距随时间的变化

Fig. 5 Change of distance between particles with time

式中 Δr_0 为两粒子初始位置的间距。

如果开始时在径向一条直线上有多个同间距 (Δr_0 相等) 的粒子, 离心移动一段时间后, 虽然任意两相邻粒子的间距比开始态是增大的, 但由于各对相邻粒子初始位置的间距 Δr_0 是相等的, 由式(12)可知各相邻粒子间距在新的时刻仍是相等的(见图 5)。

如此看来, 粒子最终在试样外侧的梯度分布, 不是在离心传输过程中产生的, 而是在离心加速后期粒子在外侧靠近型壁处沉积及金属熔体冷却降温、粘度增大和凝固共同作用形成的。如果体系在转动过程中, 冷速较慢, 发生凝固较晚, 粒子有较充足的时间向外沉积, 最终得到的材料是粒子均匀分布于试样表面的表面复合材料, 而不是梯度材料(见图 6)。因此, 要得到所需组织分布的材料, 体

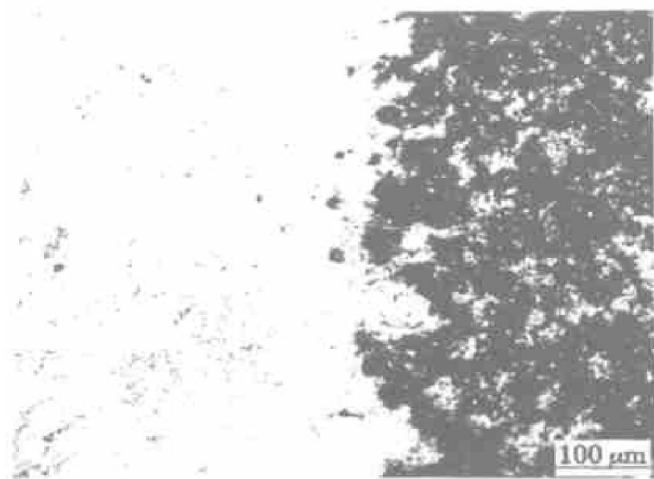


图6 SiC_p/Al-8.8%Si表面复合材料

Fig. 6 SiC_p/Al-8.8%Si surface composite material
系温度场的控制很关键。

2.4 离心力场中粒子的相互作用

在采用离心技术制备外加粒子强化梯度材料时,初始状态粒子在金属液中是均匀分布的,各粒子的初始位置不同。

如果粒子为同种粒子,即密度相同,则直径大的粒子运动速度快,在一定时间内有可能赶上其前面的小粒子(见图7)。这样会导致两种结果,一是大粒子与小粒子发生碰撞并带着小粒子一起向前运动,最终引起粒子的聚集;一是大小粒子发生碰撞后,由于两粒子的重心不在径向一条直线上或由于系统振动等原因,使小粒子发生旋转,让出路径,以便大粒子通过,最终大粒子分布到试样的最外侧

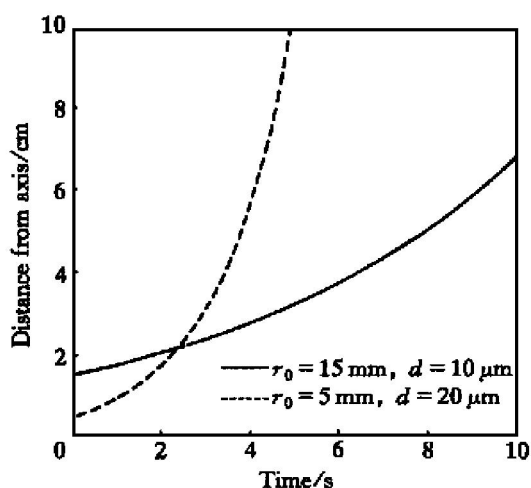


图7 不同直径的粒子在离心力场中的追逐现象

Fig. 7 Phenomenon of big particle running after small particle in centrifugal field

(见图3)。

如果粒子为密度不同的混杂粒子,但直径相同,则处于后面的密度大的粒子也可以赶上前面密

度小的粒子,产生与不同直径粒子间相互作用相同的效果。

如果离心力场中金属液内粒子的直径和密度都不同,情况更加复杂。在传输过程中,既有因尺寸不同引起的追逐现象,又有因密度不同引起的追逐现象。因此,粒子间的碰撞是频繁的。

为减少粒子运动过程中的追逐、碰撞及由此引起的粒子聚集和不稳定流动现象,采用尺寸一致的同种粒子是非常必要的。

3 结论

1) 建立了离心加速场中粒子在金属液中运动所处位置、速度及加速度与运动时间的函数关系。在离心加速场中粒子一直处于加速状态,不会达到匀速运动状态。

2) 粒子直径越大、密度越大,在同样时间内,粒子移动的距离越远。

3) 径向上初始位置不同的两个粒子,其间距随时间延长逐渐增大。如果在径向一条直线上有多个同间距的粒子,离心移动一段时间后,虽然任意两相邻粒子的间距比开始态增大,但各相邻粒子间距在新的时刻仍是相等的。

4) 如果粒子为密度、直径均不同的混杂粒子,则处于后面的密度大(或尺寸大)的粒子可以赶上并超过前边密度小(或尺寸小)的粒子。粒子间的追逐现象是引起粒子碰撞、聚集及尺寸大(或密度大)粒子偏聚到试样外侧的主要原因。为减少这些现象的产生,采用尺寸一致的同种粒子是非常必要的。

5) SiC_p/Al-8.8%Si合金梯度材料外侧大尺寸的SiC粒子含量较多,这是由离心加速场中不同尺寸粒子的追逐现象引起的。

[REFERENCES]

- [1] Koizumi M and Nino M. Overview of FGM research in Japan [J]. MRS Bull, 1995, 20(1): 19-21.
- [2] YU Si-rong(于思荣), ZHANG Xin-ping(张新平) and HE Zhen-ming(何镇明). 离心铸造梯度功能材料的研究现状 [J]. Journal of Functional Materials(功能材料), 2000, 31(Suppl.): 25-27.
- [3] Noordegraaf J, Alsem W H H, Groenenberg C J R, et al. Centrifugal casting of metal matrix composites [J]. AUSZ Eur Patentanmeld I, 1990, 6(2): 171.
- [4] YU Si-rong(于思荣). New Surface Composite Reinforced Aluminium Alloy Materials and Biomimetic Analy-

- ses(表面复合强化铝合金新材料及其仿生分析) [R]. The Researching Reports of Postdoctoral Fellow in Jilin University of Technology(吉林工业大学博士后研究工作报告), 1998.
- [5] Fukui Y, Oyama Seimiya Y, Yamanaka N, et al. Fabrication of in situ Al-Al₃Ni functionally graded material by centrifugal method [J]. J Jpn Inst Light Metal, 1994, 44(11): 622- 627.
- [6] Fukui Y, Nakanish K, Yamanaka N, et al. Fabrication of functionally gradient materials by centrifugal method and its evaluation [J]. J Jpn Soc Heat Treat, 1995, 35(1): 11- 17.
- [7] Watanabe Y, Fukui Y and Nakanishi K. Control of composition by centrifugal force in functionally graded material [J]. Journal of Mechanism Academy of Japan, (in Japanese), 1992, 58(556)(A): 240- 245.
- [8] Lajoie L and Suery M. Modelling of particle segregation during centrifugal casting of Al-matrix composites [A]. Fishman S G and Dhingra A K ed. Cast Reinforced Metal Composites, Proceedings of the International Symposium on Advances in Cast Reinforced Metal Composites [C]. Chicago, Illinois, USA, 1988. 15- 20.
- [9] Kang C G and Rohatgi P K. Transient thermal analysis of solidification in a centrifugal casting for composite materials containing particle segregation [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, 27B: 277- 285.
- [10] LIU Qing-min, JIAO Yu-ning, YANG Yuan-sheng, et al. Theoretical analysis of the particle gradient distribution in centrifugal field during solidification [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, 27B: 1025 - 1029.

Interaction of particles in metal melt in centrifugal field

YU Si-rong¹, REN Lu-quan², PANG Yu-ping²

(1. College of Materials Science and Engineering, Jilin University,

Changchun 130025, P. R. China;

2. Education Ministry Key Laboratory for Terrestrial Machine Bionics Engineering,

Jilin University, Changchun 130025, P. R. China)

[Abstract] The theoretical model of movement behavior of second phase particle in metal melt in centrifugal field was set up. The factors affecting the movement behavior of particles were analyzed with this model. The results show that the particles are in the state of accelerated motion, and can not reach the state of equal velocity motion in centrifugal field. The bigger particle diameter, and the bigger particle density, the longer the distance of particle motion will be. The phenomenon that particle runs after particle exists because of not only the difference of particle diameter but also the difference of particle density during the transport, which is the main reason that particles collide and accumulate and big particles or particles with big density segregate to the specimen outside. The distance between two particles whose initial position at radial direction is different increases gradually with time. For some particles whose space length is the same at a radial straight line, the distances between any two near particles are still equal after particles move for a moment though it is longer than that at initial position.

[Key words] centrifugal field; functional gradient material; particle; theoretical model; two-phase fluid

(编辑 袁赛前)